

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*162.5+547.45(470)

ДИНАМИКА БЮДЖЕТА УГЛЕРОДА ЛЕСОВ РОССИИ
ЗА ДВА ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЯ*

© 2011 г. Д. Г. Замолодчиков, В. И. Грабовский, Г. Н. Краев

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

117810 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

Поступила в редакцию 25.04.2011 г.

Разработана методика региональной оценки углеродного бюджета лесов, базирующаяся на балансе пополнения углеродных пулов при росте лесных насаждений и потерь при рубках, пожарах и прочих нарушениях. Осуществлены расчеты углеродного бюджета лесов для субъектов Российской Федерации за 1988–2009 гг. Сток углерода в леса России увеличился с 80 Мт С год⁻¹ в 1988 г. до 230–240 Мт С год⁻¹ во второй половине 2000-х гг. Найденная тенденция объясняется значительным сокращением объемов лесопользования, произошедшим в первой половине 1990-х гг. европейская часть России характеризуется более высокими средними величинами стока углерода по сравнению с азиатской частью, что связано с региональными особенностями организации охраны лесов от пожаров.

Углеродный бюджет, динамика лесного фонда, фитомасса, мертвая древесина, подстилка, почва, рубки леса, лесные пожары.

Современное глобальное потепление климата, вызванное антропогенным повышением концентраций парниковых газов в атмосфере, привело к стремительному росту числа научных исследований, посвященных оценке углеродного цикла и других климатообразующих функций лесного покрова. В условиях повышенного внимания к углеродному бюджету лесов задача его инвентаризации, казалось бы, должна быть давно решена. Однако по отношению к лесам России этого не произошло. Опубликованные лишь в последние годы оценки стока углерода в леса России варьируют от 100 до 600 Мт С год⁻¹ [2, 7, 11, 18, 19, 27, 28]. Указанные расхождения могут привести к выводу, что современный уровень научного знания не позволяет с достаточной точностью определить величину бюджета углерода лесов на крупнорегиональном уровне. Иначе говоря, фактическая неопределенность оценок существенно превышает их абсолютные величины.

Проблема точной идентификации наземных поглотителей углерода значительна в фундаментальном аспекте. Разные типы наземных экосистем

(леса, тундры, болота и т.д.) различным образом реагируют на климатические изменения. При огромной территории Российской Федерации вклад ее земного покрова в регуляцию парниковых газов атмосферы значим на глобальном уровне. Неопределенности пространственной и экосистемной привязки стоков углерода с неизбежностью сказываются на глобальных прогнозах климатических изменений. По отношению к лесам проблема инвентаризации бюджета углерода приобретает важный прикладной аспект. Функции лесов как поглотителя парниковых газов признаны Рамочной конвенцией ООН об изменении климата и Киотским протоколом. Подходы к зачету лесных стоков активно обсуждаются в переговорном процессе по климатическому соглашению, идущему на смену Киотскому протоколу. Ряд сторон переговорного процесса поддерживают сохранение искусственных ограничений при зачете поглощения углерода лесами в национальных бюджетах парниковых газов по причине неопределенности и расхождения независимых оценок углеродного бюджета лесов. Напомним, что в период действия Киотского протокола годовой зачет поглощения углерода лесами Российской Федерации не может превышать 33 Мт С. Искусственные ограничения препятствуют развитию крупномасштабной

* Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (Госконтракт П172) и РФФИ (11-04-01486-а).

деятельности по сохранению и усилению лесных стоков парниковых газов: зачем тратить силы и средства на углеродную оптимизацию лесопользования, если леса и так поглощают заведомо большее количество углерода, чем можно зачесть в национальном бюджете?

Формирование согласованной точки зрения на величины углеродного бюджета лесов России следует считать актуальной научной задачей. Ее решению может способствовать повышение полноты и прозрачности описания методических подходов в степени, обеспечивающей их верификацию и критику независимыми научными группами. При публикации настоящей статьи авторы ставят две цели: первая цель состоит в представлении методики региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ), являющейся обобщением предшествующих работ авторского коллектива [6–10]; вторая цель заключается в характеристике на основе РОБУЛ динамики углеродного бюджета лесов Российской Федерации за 1988–2009 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Методика РОБУЛ ориентирована на использование в качестве основного информационного источника материалов государственных учетов лесного фонда (ГУЛФ) либо Государственного лесного реестра (ГЛР). С середины 1950-х годов и до настоящего времени ГУЛФ (ныне ГЛР) является единственным источником, согласованным образом характеризующим породно-возрастную структуру лесов на пространственных уровнях от локального (лесничества) до федерального. С 1988 по 1998 г. ГУЛФ проводился один раз в пять лет, сопровождаясь формированием детальных электронных баз данных (БД) и публикацией справочников [13, 14, 16]. С 1999 по 2007 г. осуществлялась ежегодная актуализация БД ГУЛФ, однако справочник был опубликован лишь в 2003 г. [15]. С 2008 г. в связи с изменениями Лесного кодекса [12] была произведена замена ГУЛФ на ГЛР, при этом был сохранен годовой интервал актуализации БД ГЛР. Ведение и хранение БД ГУЛФ и ГЛР в настоящее время осуществляет ФГУП “Рослесинфорг”.

Методика РОБУЛ оценивает углеродный бюджет лесов по балансу потоков, то есть по разности поглощения при увеличении углеродных пулов в растущих лесных насаждениях и потерь при нарушениях (рубках, пожарах и прочих случаях гибели лесов). Расчет по балансу потоков является одним из двух базовых подходов, допускаемых руководствами Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [21].

Второй подход базируется на разности запасов углерода в последовательные годы учетов и был использован авторами в ряде предшествующих работ [3, 7]. Расчеты РОБУЛ ведутся для 4-х основных пулов углерода лесов: фитомассы, мертвой древесины, подстилки и органического вещества почвы в слое 0–30 см.

Объем журнальной публикации не позволяет со всей детальностью охарактеризовать совокупность алгоритмов РОБУЛ. Здесь мы ограничимся изложением базовых уравнений и цитированием работ, в которых приводятся табличные значения параметров. Полное описание уравнений и табличных параметров РОБУЛ помещено на веб-сайте ЦЭПЛ РАН [29]. Там же содержится программное обеспечение РОБУЛ, при помощи которого любой специалист, обладающий информацией ГУЛФ либо ГЛР, может осуществить оценку углеродного бюджета лесного региона. Лесным регионом может быть лесничество (в материалах ГУЛФ – лесхоз) либо субъект РФ.

Выбор табличных параметров расчета в РОБУЛ осуществляется в соответствии с географической принадлежностью исследуемого региона к одному из 12 зонально-региональных полигонов, образованных пересечением границ широтных полос (северная тайга, средняя тайга, более южные биоклиматические зоны) и макрорегионов (европейско-уральская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток). Подробное описание данного подхода к пространственной дифференциации природно-климатических условий приведено в работе [9].

Начальная часть расчетов по методике РОБУЛ состоит в оценке запасов углерода по возрастным группам преобладающих пород лесного региона (молодняки I класса возраста, молодняки II класса возраста, средневозрастные, приспевающие, спелые, перестойные). Запасы углерода в пулах фитомассы и мертвой древесины рассчитываются в соответствии с уравнением (1) на основе данных по объемным запасам стволовой древесины из материалов ГЛР либо ГУЛФ:

$$CB_{ij} = V_{ij}KB_{ij}CF, \quad (1)$$

где CB_{ij} – общий запас углерода в фитомассе либо мертвой древесине насаждений группы возраста j преобладающей породы i , т С; V_{ij} – объемный запас насаждений группы возраста j преобладающей породы i , м³; KB_{ij} – коэффициент пересчета объемного запаса насаждений в сухое вещество фитомассы либо мертвой древесины группы возраста j преобладающей породы i , т сух. вещ-ва м⁻³; CF – доля углерода в 1 т сух. вещ-ва фитомас-

сы либо мертвой древесины ($CF = 0.5$). Коэффициенты KB_{ij} специфичны для преобладающей породы, группы возраста и зонально-регионального полигона. KB_{ij} для фитомассы приведены в работе [8], для мертвой древесины найдены при помощи математической модели, охарактеризованной в работе [6].

Запасы углерода в пулах подстилки и почвы рассчитываются в соответствии с уравнением (2) на основе данных по площадям лесных насаждений из материалов ГЛР либо ГУЛФ:

$$CS_{ij} = S_{ij} KS_{ij}, \quad (2)$$

где CS_{ij} – общий запас углерода в подстилке либо почве насаждений группы возраста j преобладающей породы i , т С; S_{ij} – площадь насаждений группы возраста j преобладающей породы i , м²; KS_{ij} – средний запас углерода в подстилке либо почве насаждений группы возраста j преобладающей породы i , т С га⁻¹. Идентификация величин KS_{ij} для пулов подстилки и слоя почвы 0–30 см осуществлена с использованием данных [7, 22, 23].

Поглощение углерода при росте лесных насаждений оценивается на основе динамики средних значений углеродных пулов в возрастных группах лесных насаждений по совокупности уравнений (3–5):

$$MC_{ij} = C_{ij}/S_{ij}, \quad (3)$$

$$MA_{ij} = [(MC_{ij} - MC_{(i-1)j}) T_{ij}/(T_{(i-1)j} + T_{ij}) + (MC_{(i+1)j} - MC_{ij}) T_{ij}/(T_{ij} + T_{(i+1)j})]/T_{ij} \quad (4)$$

$$A_{ij} = S_{ij} MS_{ij}, \quad (5)$$

где MC_{ij} – средний запас углерода в данном пуле насаждений возрастной группы i преобладающей породы j , т С га⁻¹; C_{ij} – запас углерода в данном пуле насаждений возрастной группы i преобладающей породы j , т С; S_{ij} – площадь насаждений возрастной группы i преобладающей породы j , га; MA_{ij} – среднее годовое поглощение углерода данным пулом насаждений возрастной группы i преобладающей породы j , т С га⁻¹ год⁻¹; $MC_{(i-1)j}$ – средний запас углерода в данном пуле насаждений возрастной группы $i-1$ (предшествующей возрастной группе i) преобладающей породы j , т С га⁻¹; T_{ij} – временной интервал возрастной группы i преобладающей породы j , лет; $T_{(i-1)j}$ – временной интервал возрастной группы $i-1$ преобладающей породы j , лет; $MC_{(i+1)j}$ – средний запас углерода в данном пуле насаждений возрастной группы $i+1$ (следующая за возрастной группой i) преобладающей породы j , т С га⁻¹; $T_{(i+1)j}$ – временной интервал возрастной группы $i+1$ преобладающей породы j , лет; A_{ij} – годовое поглощение

углерода данным пулом насаждений возрастной группы i преобладающей породы j , т С год⁻¹.

Уравнения (3–5) обеспечивают учет поглощения углерода с момента появления лесного насаждения на ранее не покрытой лесом площади (вырубке, гари и т.д.). По отношению к пулам фитомассы и мертвой древесины допускается, что их значения на не покрытых лесом площадях равны 0, иначе говоря, при $i = 1$ $MC_{(i-1)j} = 0$. Пулы подстилки и почвы обладают отличными от нуля значениями на не покрытых лесом площадях, потому в расчет поглощения для молодняков I класса возраста входит разность между значениями пулов подстилки и почвы в данной возрастной группе и на не покрытых лесом землях. Поглощение углерода в перестойных насаждениях принимается равным 0.

Уравнения (1–5) дают возможность рассчитать запасы и поглощение углерода для 4-х пулов углерода в дифференциации по возрастным группам преобладающих пород оцениваемого региона. Суммирование найденных величин дает оценки для всех насаждений данной преобладающей породы, групп преобладающих пород и т.д. вплоть до всех покрытых лесом земель региона.

Потери углерода лесами связаны с различными нарушениями, среди которых наибольшее значение имеют рубки, лесные пожары, вспышки вредителей и болезней леса, гибель насаждений от действия погодно-климатических факторов. Материалы ГУЛФ и ГЛР содержат величины площадей вырубок, гарей, погибших насаждений, которые определяются балансом темпов нарушений и зарастания. Времена зарастания вырубок и гарей, найденные при сопоставлении материалов ГУЛФ и данных лесохозяйственной статистики, были предоставлены авторам Г.Н. Коровиным и О.Б. Бутусовым (личное сообщение). При известных временах зарастания вырубок и гарей на основании уравнения (6) можно оценивать годовые темпы нарушений:

$$ADS = DS/TR, \quad (6)$$

где ADS – годовая площадь данного типа деструктивного нарушения, га год⁻¹; DS – не покрытая лесом площадь, являющаяся последствием данного типа деструктивного нарушения, га; TR – время зарастания не покрытых лесом площадей данного типа, лет.

Уравнение (6) позволяет оценивать бюджет углерода лесов на основе материалов ГЛР и ГУЛФ, без привлечения дополнительной информации о масштабах деструктивных нарушений. Если такая информация имеется, то возможен расчет

бюджета по текущим величинам деструктивных нарушений, поскольку последующие уравнения индифферентны к характеру оценки темпов нарушений.

Оценка потерь углерода фитомассой и мертвой древесиной при сплошных рубках проводится по средним значениям углеродных пулов для возрастной группы спелых насаждений (то есть тех, в которых проводятся рубки) оцениваемого региона. Расчет потерь углерода фитомассой и мертвой древесиной при сплошных рубках осуществляется с использованием уравнения (7):

$$LBH = AHS CB_m / S_m, \quad (7)$$

где LBH – годовые потери углерода фитомассой либо мертвой древесиной при сплошных рубках, т С год⁻¹; AHS – годовая площадь сплошных рубок, га год⁻¹; CB_m – суммарный запас углерода фитомассы либо мертвой древесины в спелых лесных насаждениях оцениваемого региона, т С; S_m – суммарная площадь спелых лесов оцениваемого региона, га.

Поскольку лесные пожары и прочие естественные нарушения могут охватывать насаждения любого возраста, для оценки потерь фитомассы и мертвой древесины при таких нарушениях используются средние значения по всем лесам оцениваемого региона. В этом случае потери углерода рассчитываются на основе уравнения (8):

$$LBF = AFS C_a / S_a, \quad (8)$$

где LBF – годовые потери углерода фитомассой либо мертвой древесиной при пожарах и прочих естественных нарушениях, т С год⁻¹; AFS – годовая площадь пожаров и прочих естественных нарушений, га год⁻¹; C_a – суммарный запас углерода фитомассы либо мертвой древесины на покрытых лесом землях оцениваемого региона, т С; S_a – суммарная площадь покрытых лесом земель оцениваемого региона, га.

Подчеркнем, что потери углерода, рассчитываемые на основании уравнений (7) и (8), включают изъятие древесины при рубках, прямые пожарные эмиссии, а также послерубочные и послепожарные эмиссии крупных древесных остатков. Реальное поступление углерода в атмосферу при разложении послерубочных и послепожарных древесных остатков продолжается в течение многих лет и даже десятилетий. При постоянстве масштабов нарушений количество древесных остатков, остающихся на вырубках и гарях данного года, будет приблизительно равно суммарному для данного года объему послерубочных и послепожарных эмиссий от нарушений предше-

ствующих лет. При наличии вариаций нарушений используемый подход ведет к переоценке потерь в годы с масштабами нарушений выше средне-многолетних и недооценке в противоположной ситуации.

При деструктивных нарушениях происходит частичное снижение запаса углерода подстилки и почвы вплоть до значений, свойственных не покрытым лесом землям. Потери пулов подстилки и почвы при сплошных рубках рассчитываются на основании уравнения (9):

$$LSH = AHS (CS_m / S_m - MCL_0), \quad (9)$$

где LSH – годовые потери углерода подстилкой либо почвой покрытых лесом земель оцениваемого региона при сплошных рубках, т С год⁻¹; AHS – годовая площадь сплошных рубок, га год⁻¹; CS_m – суммарный запас углерода подстилки либо почвы в спелых лесах оцениваемого региона, т С; MCL_0 – средний запас углерода подстилки на вырубках, рассчитанный с учетом соотношения площадей преобладающих пород в спелых лесах, т С га⁻¹; S_m – суммарная площадь спелых лесов оцениваемого региона, га.

Потери пулов подстилки и почвы при деструктивных лесных пожарах рассчитываются с использованием уравнения (10):

$$LSF = AFS (CS_a / S_a - MCL_0), \quad (10)$$

где LSF – годовые потери углерода подстилкой либо почвой покрытых лесом земель оцениваемого региона при деструктивных пожарах, т С год⁻¹; AFS – годовая площадь деструктивных пожаров, га год⁻¹; CS_a – суммарный запас углерода подстилки либо почвы на покрытых лесом землях оцениваемого региона, т С; MCL_0 – средний запас углерода подстилки на гарях, рассчитанный с учетом соотношения площадей преобладающих пород на всех покрытых лесом землях оцениваемого региона, т С га⁻¹; S_a – суммарная площадь покрытых лесом земель оцениваемого региона, га.

Годичный бюджет по каждому из пулов углерода рассчитывается для покрытых лесом земель оцениваемого объекта по разности поглощения и потерь:

$$BC = A - LH - LF, \quad (11)$$

где BC – годичный бюджет по данному пулу углерода покрытых лесом земель оцениваемого региона, т С год⁻¹; A – годовое поглощение углерода данным пулом, т С год⁻¹; LH – годовые потери углерода данным пулом при сплошных рубках, т С год⁻¹; LF – годовые потери углерода данным

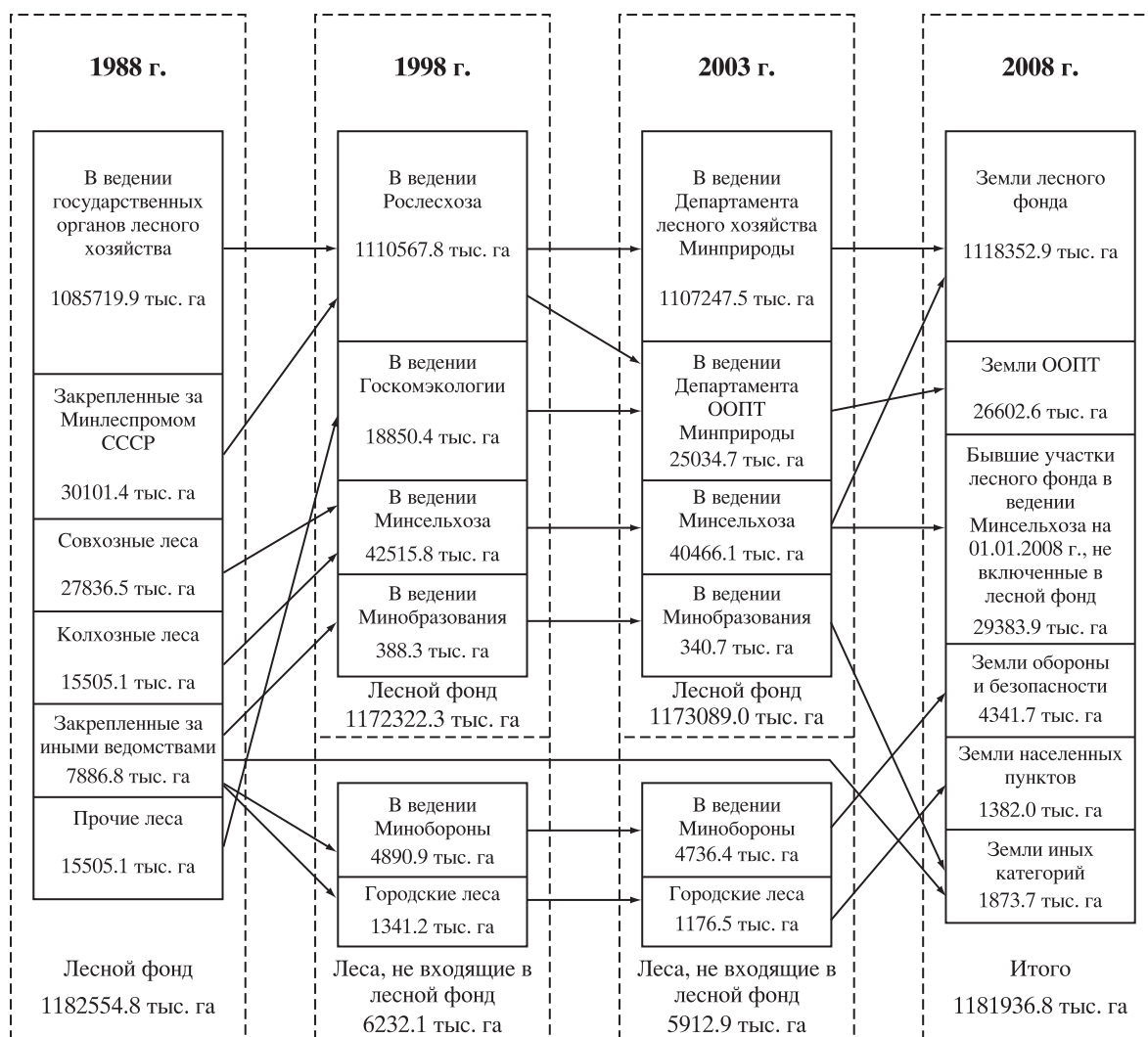


Рис. 1. Изменения полномочий по управлению лесами в Российской Федерации.

пулом при деструктивных лесных пожарах и прочих естественных нарушениях, т С год⁻¹. Суммирование бюджетов по всем пулам дает искомую оценку бюджета углерода лесов оцениваемого региона.

Расчеты проводились на уровне субъектов РФ, основным информационным источником служили БД ГУЛФ и ГЛР по состоянию на 1988, 1993, 1998–2009 гг., предоставленные ФГУП “Рослесинфорг”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемая в настоящей работе система РОБУЛ в качестве исходных данных использует учетные материалы земель лесного фонда, которые формируются государственными органами и с неизбежностью отражают административные изменения полномочий по управлению лесами.

Для четкого определения объекта исследования охарактеризуем эти изменения (рис. 1), используя опубликованные справочники ГУЛФ [14–16] и БД ГЛР по состоянию на 2008 г. При последнем ГУЛФ советского времени [16] площадь лесного фонда составляла 1 182 554.8 тыс. га. К 1998 г. из состава лесного фонда были выведены леса Минобороны и городских поселений. В лесном кодексе в редакции 2006 г. [12] вместо понятия “лесной фонд” использована категория “земли лесного фонда”. Площадь земель лесного фонда по состоянию на 2008 г. составила 1 118 352.9 тыс. га. Суммарная площадь с учетом бывших составляющих лесного фонда, отнесенных к другим категориям земель: особо охраняемых природных территорий, обороны и безопасности, населенных пунктов и др., составляет 1 181 936.8 тыс. га. Это лишь на 0.05% меньше территории лесного фонда по состоянию на 1988 г. Таким образом, следует констатировать

Таблица 1. Динамика структуры земель лесного фонда Российской Федерации

Категория земель	Площадь, 10 ³ га				
	1988 г.	1993 г.	1998 г.	2003 г.	2008 г.
Покрытые лесом земли	758715.7	750953.1	763826.0	767473.6	787147.8
Не покрытые лесом земли, в том числе	111731.0	121075.8	106576.1	105858.5	93344.1
редины	63457.5	75279.5	70094.5	69720.9	61544.2
гари и погибшие насаждения	30081.9	28652.2	25161.2	27300.3	23402.0
вырубки	8876.0	8849.0	5126.2	3732.4	3868.6
Нелесные земли, в том числе	299053.2	292131.3	293844.3	294194.4	288983.1
сенокосы и пастбища	20579.9	20147.4	19785.7	19892.0	13847.6
болота и прочие земли	254448.0	249556.6	251453.8	251245.5	252632.0
Все земли	1169499.9	1164160.2	1164246.4	1167526.5	1169475.0

отсутствие значимых изменений землепользования на площадях лесного фонда в 1988–2008 гг.

БД ГУЛФ и ГЛР ведутся подведомственными организациями Рослесхоза (заметим, что статус этого ведомства неоднократно менялся в новейшей российской истории). Предметом пристального внимания при проведении учетов были только те территории, которые относились к ведению собственно Рослесхоза, ныне это земли лесного фонда. Для них все последовательные версии БД ГУЛФ и ГЛР содержат детальную информацию по площадям и запасам древесины насаждений на покрытых лесом землях и площадям не покрытых лесом (вырубки, гари, прогалины и т.д.) и нелесных (пастбища, пески, болота и т.д.) земель. Учетные материалы из других ведомств вносили в БД ГУЛФ и ГЛР периодически и не всегда в полном объеме. При подготовке информации БД ГУЛФ и ГЛР к включению в систему РОБУЛ нами была проведена гармонизация, состоявшая в заполнении имевшихся информационных пробелов по прочим ведомствам. При проведении гармонизации учетные данные, поступившие из прочих ведомств, не модифицировались, а добавлялись из предшествующих либо последующих версий БД ГУЛФ и ГЛР. Результаты гармонизации характеризуют динамику структуры площадей и породно-возрастной структуры лесов на 99% территории, ранее относившихся к лесному фонду страны. В соответствии с терминологией действующего Лесного кодекса, объект оценки РОБУЛ можно определить как леса на землях лесного фонда (включая леса, бывшие в ведении Минсельхоза) и ООПТ.

Гармонизация динамики структуры площадей бывшего лесного фонда (табл. 1) позволяет выявить ряд тенденций, сказывающихся, как будет

показано ниже, на углеродном бюджете лесов России. В первую очередь это рост покрытых лесом площадей на 28.4 млн. га с 1988 по 2008 г., за исключением периода 1988–1993 гг., когда площадь лесов снизилась на 7.8 млн. га. Детальный анализ информации по субъектам РФ показывает, что это изменение относится к территории Красноярского края (включая образованные в то время Эвенкийский и Таймырский автономные округа). При формировании ГУЛФ 1993 г. на этой территории 8.8 млн га были исключены из покрытой лесом площади и переведены в категорию редины. Кроме того, туда были включены около 4.1 млн га из категории болот. К 1998 г. 6.4 млн га из состава редины были переведены в категорию болот. Эти серьезные изменения структуры площадей связаны с совершенствованием технологий учетов лесов. ГУЛФ 1988 г. для лесов отдаленных территорий Сибири включал сведения аэровизуальных обследований 1950-х годов. В 1990-х годах была проведена инвентаризация отдаленных лесов на основе спутниковых технологий, что и привело к указанным вариациям информации ГУЛФ.

Рост покрытых лесом площадей 1988–2008 гг. произошел за счет сокращения не покрытых лесом земель на 18.4 млн га (из них вырубок – 5.0 млн га и гарей – 6.7 млн га) и нелесных земель на 10.0 млн га (из них сенокосов и пастбищ – на 6.7 млн га). Увеличение площадей лесов шло в основном за счет мягколиственных пород, площадь насаждений которых возросла на 19.6 млн га (табл. 2). В то же время площадь хвойных лесов снизилась на 7.6 млн га. Здесь, безусловно, сказывается упомянутая выше актуализация учетных данных по Красноярскому краю. С 1993 по 2008 г. площадь хвойных насаждений возросла на 10.8 млн га, что

Таблица 2. Динамика породно-возрастной структуры лесов Российской Федерации

Группа пород	Группа возраста	Площадь, 10 ³ га						Запас древесины, 10 ⁶ м ³					
		1988 г.	1993 г.	1998 г.	2003 г.	2008 г.	1988 г.	1993 г.	1998 г.	2003 г.	2008 г.		
Хвойные	Молодняки I класса возраста	47813.7	45907.1	44319.0	45884.8	42063.7	642.3	602.7	615.2	630.0	598.1		
	Молодняки II класса возраста	41180.6	45126.5	48937.3	49723.3	51614.1	2191.9	2351.9	2489.2	2538.6	2585.3		
	Средневозрастные	107584.5	120175.8	123640.9	122805.6	128047.6	12650.2	14865.1	15083.3	14953.5	15251.9		
	Приспевающие	53569.8	51940.8	54906.1	54829.9	55202.6	8189.2	8115.3	8581.3	8630.6	8659.0		
	Спелые	174697.6	146671.4	142233.6	140300.8	142318.7	23088.7	19244.5	18698.2	18399.7	18124.6		
	Перестойные	121195.2	117824.2	114584.9	113814.6	119182.6	16774.6	15872.2	15694.6	15592.1	15795.7		
	Итого	546041.4	527645.8	528621.8	527359.0	538429.3	63536.9	61051.8	61161.9	60744.5	61014.6		
Мягколиственные	Молодняки I класса возраста	12345.9	12436.1	13076.8	13136.4	12336.8	123.0	125.2	131.4	134.4	126.9		
	Молодняки II класса возраста	12960.5	13831.3	14108.5	14243.7	13829.9	432.4	439.9	447.9	455.1	439.5		
	Средневозрастные	46437.1	48047.5	49658.0	51455.8	53041.5	4505.2	4735.1	4902.8	5116.2	5228.7		
	Приспевающие	17012.2	16523.5	17507.8	17874.6	18217.0	2294.3	2387.5	2572.0	2653.5	2676.0		
	Спелые	24812.5	24706.6	26812.6	28036.8	30226.2	3619.9	3806.6	4248.4	4471.4	4885.8		
	Перестойные	18655.2	20209.9	21092.0	22202.6	24166.6	3277.2	3532.7	3715.9	3904.9	4234.5		
	Итого	132223.4	135754.9	142255.7	146949.9	151818.0	14251.9	15027.0	16018.3	16735.5	17591.4		
Итого покрытые лесом земли	Молодняки I класса возраста	62314.9	60382.4	59238.1	60806.0	56095.5	789.4	749.2	766.8	783.8	744.0		
	Молодняки II класса возраста	61728.0	68098.5	75628.5	76912.6	78890.5	2758.6	2928.8	3096.2	3157.5	3186.8		
	Средневозрастные	185839.7	206723.3	217363.5	217774.5	227270.6	18390.2	20912.1	21456.0	21537.2	21938.3		
	Приспевающие	79974.0	77711.9	82207.8	82512.0	84626.3	10895.3	10912.4	11586.2	11722.3	11840.7		
	Спелые	221126.4	192488.2	187421.1	187099.8	191928.5	27828.6	24155.7	24043.5	23995.8	24191.5		
	Перестойные	147732.7	145548.8	141967.0	142368.7	148336.4	20461.0	19846.2	19849.2	19956.4	20476.9		
	Итого	758715.7	750953.1	763826.0	767473.6	787147.8	81123.1	79504.3	80797.9	81153.0	82378.2		

Примечание. Категория "Итого покрытые лесом земли", помимо хвойных и мягколиственных, включает кустарники, твердолиственные и прочие породы.

следует принять в качестве корректной оценки двадцатилетних изменений.

Увеличение площади покрытых лесом земель, в первую очередь идущее за счет снижения площадей вырубок, пастбищ и сенокосов, связано со снижением антропогенного воздействия на леса. Социально-экономические реформы начала 1990-х годов сделали нерентабельным проведение лесозаготовок в районах со слаборазвитой инфраструктурой, что привело к резкому сокращению лесопользования. Площадь сплошных рубок к 1998 г. сократилась в 4 раза по сравнению с 1988 г. (рис. 2). В результате темпы зарастания вырубок стали преобладать над их пополнением за счет сплошных рубок. Спад сельскохозяйственного производства резко сократил выпас скота и заготовку сена на нелесных землях лесного фонда, обеспечив возможность естественного лесовозобновления на этих территориях.

Статистические сведения о размерах пройденной огнем площади (рис. 2) свидетельствуют о высокой межгодовой вариабельности масштабов лесных пожаров, в значительной степени связанной с изменчивостью погодных условий. Отметим, что представленные данные характеризуют площадь, пройденную всеми типами пожаров (верховыми, низовыми, почвенными), без указания последующего состояния лесных насаждений. Гибель лесов после пожаров присутствует не во всех случаях, что определяется степенью повреждения и устойчивостью пройденного огнем лесного насаждения. Информация о гибели лесных насаждений от пожаров собирается в рамках системы санитарного и лесопатологического мониторинга, проводимого Российским центром защиты леса (Рослесозащита). Принимая во внимание эти сведения [20], можно заключить, что в 2005–2009 гг. послепожарная гибель лесных насаждений составляла в среднем 25% от пройденной огнем площади, варьируя от 7 до 100%.

Официальная статистика включает сведения не по всем лесным пожарам. До 2005 г. территория лесного фонда подразделялась на охраняемую от пожаров и не охраняемую; пройденные огнем площади регистрировались лишь для охраняемой части. Ныне в лесах России выделяются зоны наземного, авиационного и двухуровневого космического мониторинга [1], при этом официальные статистические данные формируются на основе первых двух типов. Сравнение официальных статистических сведений с дистанционными оценками, по данным спутника Terra-MODIS [4], показало, что в 2002–2007 гг. официальные оценки охватывали лишь 30% площадей лесных пожа-

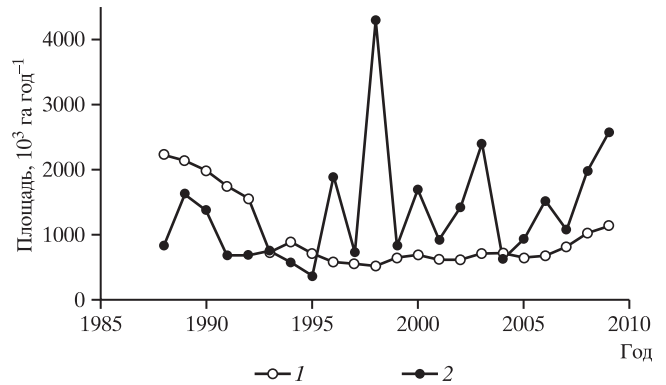


Рис. 2. Площади сплошных рубок (1) и пожаров (2) в лесах Российской Федерации.

ров. Учитывая это соотношение, а также 25%-ю долю гибели лесов после пожаров (см. выше), авторы настоящей работы принимают допущение, что официальные сведения о пройденной огнем площади лесов можно использовать в качестве приближенной оценки ежегодного масштаба деструктивных лесных пожаров.

Расчеты углеродного бюджета лесов России были проведены в двух вариантах (рис. 3): 1) с определением масштабов нарушений по площадям вырубок, гарей и погибших насаждений; 2) при использовании официальной статистики для сплошных рубок и лесных пожаров (рис. 2). Далее будем называть эти варианты РОБУЛ1 и РОБУЛ2 соответственно. В результатах по РОБУЛ1 хорошо просматривается тенденция к повышению стока углерода в леса России с 80 Мт С год⁻¹ в 1988 г. до 230–240 Мт С год⁻¹ во второй половине 2000-х годов. Эта тенденция связана с сокращением объемов лесопользования, которое подробно обсуждалось выше. При расчете РОБУЛ2 величины бюджета варьируют от 70 (1998 г.) до 287 (2001 г.) Мт С год⁻¹, что связано с влиянием пожаров. Тенденция к повышению стока углерода в конце 1990-х годов прослеживается и в этом случае. Среднее значение бюджета углерода лесов России за 1988–2009 гг. по РОБУЛ1 составляет 175 Мт С год⁻¹, по РОБУЛ2 – 168 Мт С год⁻¹. Близость указанных величин свидетельствует о достаточной корректности сделанного выше допущения, касающегося деструктивных лесных пожаров.

Сток углерода в леса России складывается из баланса поглощения (382 Мт С год⁻¹ в среднем за 1988–2009 гг.), с одной стороны, потерь от рубок (85 Мт С год⁻¹) и лесных пожаров (122 Мт С год⁻¹). Из углеродных пулов главным поглотителем является фитомасса (75%), на долю мертвой древесины, подстилки и слоя почвы 0–30 см

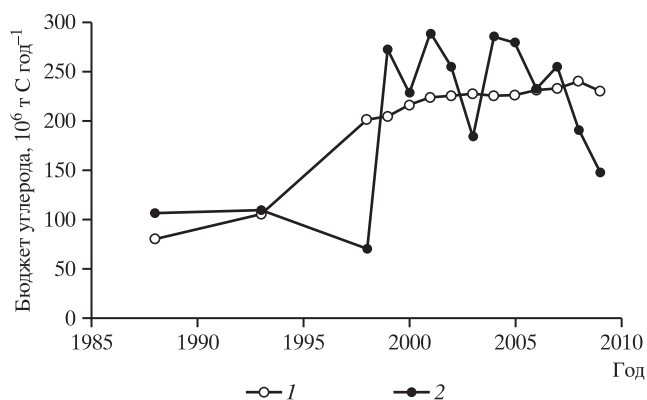


Рис. 3. Динамика углеродного бюджета лесов России при оценке масштабов нарушений по площадям вырубок и гарей (1) и сведениям лесохозяйственной статистики (2).

приходится соответственно 8, 3 и 14%. Детальная характеристика величин поглощения и потерь углерода с дифференциацией по пулам (при расчете нарушений по площадям вырубок и гарей) представлена в табл. 3. Явно прослеживаются тенденции к умеренному увеличению поглощения (за счет роста покрытых лесом площадей),

сильному снижению потерь от рубок и умеренному снижению потерь от пожаров. Совокупность этих тенденций обеспечивает трехкратный рост стока углерода в леса.

Расчеты РОБУЛ осуществлены на уровне субъектов РФ, что создает возможность рассмотрения пространственного распределения бюджета углерода лесов. В 1988 г. леса почти всей территории Дальнего Востока, частично Восточной Сибири, а также севера европейской части России были источником углерода (рис. 4а). К 2008 г. леса этих регионов характеризовались небольшим стоком углерода (рис. 4б), за исключением Тувы и лесной части Чукотского АО. Леса с максимальными величинами стока углерода как в 1988 г., так и в 2008 г. были приурочены к средней полосе европейской части России.

Отмеченные особенности пространственного распределения стоков и источников углерода в лесах вполне объяснимы географическими особенностями осуществления лесохозяйственной деятельности. Принципиальные различия между европейско-уральской и азиатской частями

Таблица 3. Динамика бюджета углерода лесов России

Поток углерода	Пул углерода	Величина потока, 10 ⁶ т С год ⁻¹				
		1988 г.	1993 г.	1998 г.	2003 г.	2008 г.
Поглощение	Фитомасса	252.6	256.3	267.1	275.8	275.1
	Мертвая древесина	33.1	37.1	39.8	41.6	41.8
	Подстилка	12.3	13.1	13.8	13.8	13.3
	Слой почвы 0–30 см	55.1	61.0	65.4	66.6	66.4
	Итого	353.0	367.5	386.0	397.8	396.6
Потери от сплошных рубок	Фитомасса	-83.9	-88.2	-51.7	-39.3	-42.7
	Мертвая древесина	-16.9	-17.7	-9.9	-7.6	-8.5
	Подстилка	-4.5	-4.9	-2.7	-2.0	-2.1
	Слой почвы 0–30 см	-17.3	-17.8	-10.2	-7.4	-7.7
	Итого	-122.6	-128.6	-74.6	-56.3	-61.1
Потери от пожаров и естественных нарушений	Фитомасса	-97.2	-84.2	-68.7	-70.4	-58.6
	Мертвая древесина	-17.3	-14.7	-12.0	-12.2	-10.1
	Подстилка	-4.8	-4.9	-4.1	-4.3	-3.8
	Слой почвы 0–30 см	-30.7	-29.3	-25.7	-27.6	-23.7
	Итого	-150.1	-133.2	-110.5	-114.5	-96.1
Бюджет	Фитомасса	71.5	83.8	146.7	166.0	173.8
	Мертвая древесина	-1.1	4.6	17.8	21.8	23.2
	Подстилка	2.9	3.3	6.9	7.5	7.4
	Слой почвы 0–30 см	7.0	13.9	29.5	31.6	34.9
	Итого	80.3	105.7	200.9	227.0	239.4

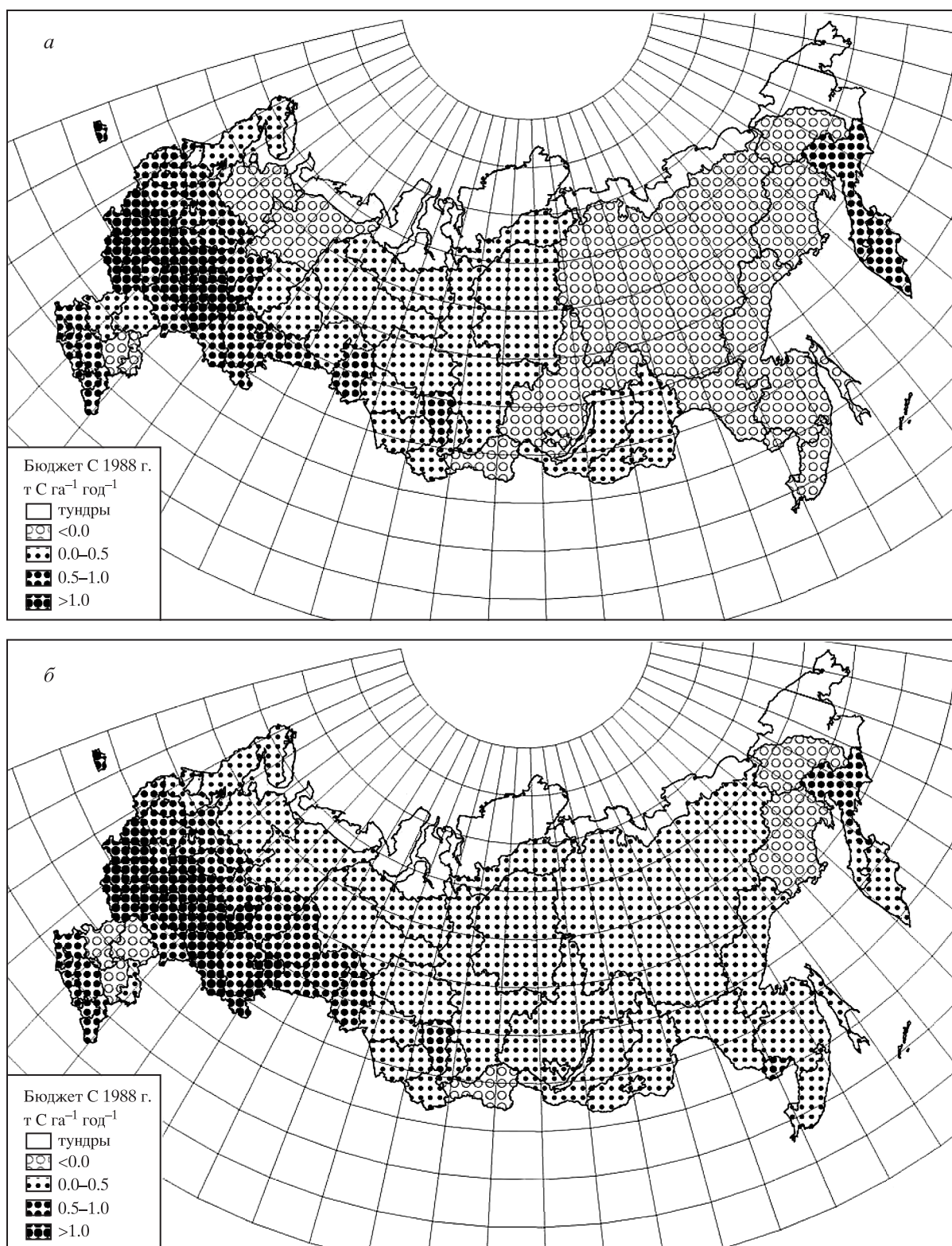


Рис. 4. Распределение средних величин бюджета углерода лесов по субъектам Российской Федерации в 1988 (а) и 2008 (б) гг.

России связаны с влиянием пожаров. В европейско-уральской части преобладает наземная форма организации охраны лесов от пожаров [1], как правило, достаточно эффективно выполняющая свои функции. Исключения представляют лишь крайне жаркие и засушливые годы, каким было, например, лето 2010 г. В Сибири и на Дальнем Востоке велика зона космического мониторинга лесных пожаров (ранее не охраняемая от пожаров территория лесного фонда), в которой борьба с лесными пожарами проводится лишь в том случае, когда они угрожают населенными пунктами и объектам инфраструктуры. Потому в этих регионах пожары охватывают огромные площади и влекут за собой значительные потери углерода лесов. Причиной усиления стока углерода в леса с 1988 по 2008 г., как уже отмечалось выше, является снижение уровня заготовок древесины (рис. 2). Это снижение прошло по всей территории России, повысив сток углерода в леса европейской части и почти ликвидировав лесные источники углерода на Дальнем Востоке.

В ряде предшествующих работ [3, 7] авторы использовали метод оценки бюджета углерода по разности запасов. Определенная по этому методу средняя за 1990–2005 гг. величина бюджета углерода управляемых лесов России (сюда для отчетности по Рамочной конвенции об изменении климата (РКИК) ООН относится около 70% площади российских лесов) составила 93 Мт С год⁻¹. Оценка РОБУЛ1 для того же периода и тех же площадей лесов равна 109 Мт С год⁻¹, таким образом, смена расчетного подхода существенно не изменила искомую величину. Применимость метода расчета по разности запасов к лесам России ставилась под сомнение в работе [19]. Проведенное сравнение доказывает, что в области своего применения различные методы оценки приводят к сходным результатам. Метод разности запасов в применении к лесам России перестал давать корректные результаты после 2006 г., когда в связи с реформами национальной системы лесопромышленного управления пропала возможность выделения стабильных площадей управляемых лесов по материалам ГЛР.

В серии публикаций [17, 19] сток углерода в леса России оценивается в 500 Мт С год⁻¹. В качестве основы расчета авторы используют величину среднего прироста из ГУЛФ и ГЛР. Напомним, что средний прирост оценивается по отношению запаса насаждения к его возрасту. Поэтому даже в старовозрастных насаждениях при практически стабильном запасе древесины средний прирост имеет достаточно высокие значения. Средний возраст хвойных насаждений России, согласно

ГЛР 2008 г. составляет 95 лет для сосны, 117 лет для ели, 112 лет для лиственницы. На основе таблиц хода роста, например [5], легко убедиться, что в насаждениях такого возраста средний прирост превышает текущий (то есть разность запасов насаждений последовательных возрастов) на 30–100% в зависимости от бонитета. Отметим, что поглощение углерода фитомассой (табл. 3) по сути является оценкой текущего прироста, выраженного в единицах массы углерода. Используя обобщенный коэффициент конверсии из запаса древесины в углерод биомассы (для лесов России он равен 0.387) и ограничив расчет поглощения углерода биомассой лишь лесами на землях лесного фонда, получаем оценку текущего прироста 600.4 млн м³ год⁻¹, которая на 36% меньше фигурирующей в материалах ГЛР 2008 г. величины среднего прироста – 947.3 млн м³ год⁻¹.

Второй источник расхождений наших оценок и результатов [17, 19] связан с учетом влияния нарушений. Согласно нашим расчетам, рубки, пожары и прочие естественные нарушения в 2000-е годы приводили к ежегодным потерям 170 Мт С год⁻¹. Аналогичная величина в работе [17] оценена в 100 Мт С год⁻¹. При использовании текущего прироста вместо среднего и ревизии значений потерь углерода цитируемые результаты стали бы близки к полученным в настоящей работе.

В работе [18] бюджет углерода оценен по балансу чистой продукции экосистемы (*NPP*), гетеротрофного дыхания почвы и потерь, вызванных нарушениями почв и древостоев. Итоговый результат составил 528 Мт С год⁻¹. Однако в этот баланс не были включены эмиссии от разложения мертвой древесины, согласно [6] равные 324 Мт С год⁻¹. С учетом этих эмиссий, цитируемая оценка бюджета понизится до 204 Мт С год⁻¹, что полностью соответствует приводимым в настоящей статье результатам.

Среди имеющихся публикаций по различным аспектам динамики лесного фонда России, в том числе углеродному циклу лесов, наибольшей известностью пользуются многочисленные работы авторского коллектива из Международного института прикладного системного анализа (IIASA) [24, 26–28 и др.]. В работе [26] сток углерода в леса России оценивается как 210 Мт С год⁻¹ при значительной коррекции результатов лесных учетов. Без такой коррекции оценка стока по данным тех же авторов равна 130 Мт С год⁻¹. Поскольку эти величины относятся к периоду 1961–1998 гг., их не следует считать согласующимися с нашими оценками. В более поздних публикациях IIASA

[27, 28] оценка современного стока углерода в леса России повышена до 600 Мт С год⁻¹. Пока эти данные опубликованы в материалах конференций, что не позволяет провести их детальный анализ. Недавно опубликованное сравнение различных подходов (включая атмосферные инверсии) к определению чистой биомной продукции для Центральной Сибири [25] показало, что система оценки IIASA приводит к самым высоким значениям стока углерода.

Заключение. Результаты настоящей работы со всей очевидностью показывают, что углеродный бюджет лесов в первую очередь определяется характером и интенсивностью лесохозяйственной деятельности. Снижение объемов лесозаготовок, связанное с социально-экономическими преобразованиями после распада СССР, привело к значительному повышению стока углерода в леса России. Различия организации охраны лесов от пожаров проявляются в различиях углеродного бюджета европейской и азиатской частей России. Безусловно, природно-климатические условия сказываются на темпах роста лесных насаждений, однако реализация биофизического потенциала лесов по поглощению углерода зависит от управляющей деятельности человека.

* * *

Авторы благодарны Г.Н. Коровину (ЦЭПЛ РАН) и О.Б. Бутусову (МосГУ) за информацию о сроках зарастания вырубок и гарей в лесном фонде России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е.* Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ Рослесхоз) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов.* Т. 7. № 2. М.: ООО "ДоМира", 2010. С. 419–429.
2. *Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б.* Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // *Сибирский экол. журн.* 2005. № 2. С. 631–649.
3. *Гитарский М.Л., Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Карабань Р.Т.* Эмиссия и поглощение парниковых газов в лесах России в связи с выполнением обязательств по климатической конвенции ООН // *Лесоведение.* 2006. № 6. С. 34–44.
4. *Ершов Д.В., Ковганко К.А., Сочилова Е.Н.* ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-MODIS и государственного учета лесов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов.* М.: ООО "Азбука-2000", 2009. Вып. 6. Т. II. С. 365–372.
5. *Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г.* Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
6. *Замолодчиков Д.Г.* Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // *Лесоведение.* 2009. № 4. С. 3–15.
7. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л.* Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // *Лесоведение.* 2007. № 6. С. 23–34.
8. *Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В.* Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // *Лесная таксация и лесоустройство.* 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.
9. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Честных О.В., Сонген Б.* Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: КМК, 2005. 200 с.
10. *Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Пряжников А.А., Замолодчиков Д.Г.* Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // *Лесоведение.* 1993. № 5. С. 3–10.
11. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
12. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 14.06.2011)
13. Лесной фонд России (по учету на 1 января 1993 года): Справочник. М.: ВНИИЦ Лесресурс, 1995. 280 с.
14. Лесной фонд России (по учету на 1 января 1998 года): Справочник. М.: ВНИИЦ Лесресурс, 1999. 650 с.
15. Лесной фонд России (по учету на 1 января 2003 года): Справочник. М.: ВНИИЛМ, 2003. 640 с.
16. Лесной фонд СССР (по учету на 1 января 1988 года): Справочник. М.: ВНИИЦ Лесресурс, 1990. Т. 1. 1005 с.
17. *Моисеев Б.Н.* Баланс органического углерода в лесах и растительном покрове России // *Лесное хозяйство.* 2007. № 2. С. 13–16.

18. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С. 1–12.
19. *Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н.* Методика МГЭИК для расчета годичного депонирования углерода и оценка ее применимости для лесов России // Лесное хозяйство. 2009. № 4. С. 11–13.
20. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов России за 2009 год. Пушкино: Российский центр защиты леса, 2010. 179 с.
21. Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК, 2003. 649 с.
22. *Честных О.В., Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И.* Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
23. *Честных О.В., Лыжин В.А., Кокишарова А.В.* Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
24. *Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck V., Mattias J., Obersteiner M.* Full carbon account for Russia. IIASA Interim Report, 1R-00-021. Luxenburg, Austria: IIASA, 2000. 181 p.
25. *Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Handoh I., Peylin P., Rodenbeck C., Lucht W., Nilsson S., Schmullius C.* Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and dynamic global vegetation models // Global Change Biology. 2011. V. 17. № 1. P. 351–365.
26. *Shvidenko A., Nilsson S.* Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961–1998: an assessment based on long-term forest inventory data // Climatic Change. 2002. V. 55. P. 5–37.
27. *Shvidenko A., Schepaschenko D., Maksyutov S.* Impact of terrestrial ecosystems of Russia on the global carbon cycle from 2003–2008: An attempt of synthesis // Proceedings of the International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010. Tomsk, 2010. P. 48–52.
28. *Shvidenko A., Schepaschenko D., Mc Callum I., Santoro M., Schmullius C.* Use of remote sensing products in a terrestrial ecosystems verified full carbon account: Experiences from Russia // Proceedings of I Conference “Earth Observation for Land-Atmosphere interaction Science”, Frascat, Italy, 3–5 November 2010. ESA SP-688. 2011. CD ROM. 8 p.
29. www.cepl.rssi.ru/carbon.htm

Dynamics of Carbon Budget in Forests of Russia for Last Twenty Years

D. G. Zamolodchikov, V. I. Grabovskii, G. N. Kraev

A methodology for the regional assessment of carbon budget in forests based on the balance between the supplement of carbon pools in the course of forest growth and their losses in cutting, fires, and other disturbances was elaborated. The carbon budget was calculated for subjects of the Russian Federation for 1988–2009. In Russia, the carbon stock increased from 80 in 1988 to 230–240 Mt yr⁻¹ in the late 2000s. The trend revealed is explained by the considerable reduction in the scope of forest use in the early 1990s. European Russia is characterized by the higher mean carbon stock as compared to that in the Asian part due to specific features of the forest protection against fires organized in the region.